

УДК 621.762

Т.І. Матченко, канд. техн. наук  
О.С. Рожновська**АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ СТВОРЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ  
З ВИСОКОЮ МІЦНІСТЮ НА РОЗТЯГ**

Інститут транспортних технологій НАУ, e-mail: veruzhsky@mbox.com.ua

*Проведено аналіз технологічних процесів створення конструкційних металокомпозитів з високими заданими значеннями міцності, жорсткості та низькими заданими значеннями густини, термічного розширення.***Вступ**

Існуючі природні та штучні матеріали не задовольняють технічні вимоги, тому необхідно створення нових матеріалів, які мають, насамперед, такі властивості:

- 1) високий ступінь радіаційного захисту;
- 2) керовану надпровідність;
- 3) надтвердість;
- 4) керовану жорсткість;
- 5) здібність за заданою командою змінити свій власний стан;
- 6) здібність “лікувати” пошкодження та дефекти втомі;
- 7) здібність відновлювати свою структуру після зняття впливу;
- 8) здібність змінити характер анізотропії у зв’язку зі зміною характеру навантаження;
- 9) надтугоплавкість;
- 10) здібність змінити форму виробу, густину, однорідність;
- 11) здібність зростати за заданою програмою із заданою структурою, забезпечуючи обмін речовин у місцях пошкоджень;
- 12) надлегкість.

Тверде тіло може розколюватися, (наприклад, слюда) або розподілятися на частини внаслідок течії (наприклад, смола). Можна очікувати, що ідеальний кристал буде найбільш міцною формою твердого тіла, тому міцність такого кристала повинна бути верхньою межею досягнутих значень міцності.

**Мета роботи** – запропонувати ідеальну кристалічні ґрати, які забезпечують можливо більший модуль Юнга, максимальну міцність на відрив, максимальну міцність на зсув, малу густину, високу температуру плавлення, низький коефіцієнт термічного розширення.

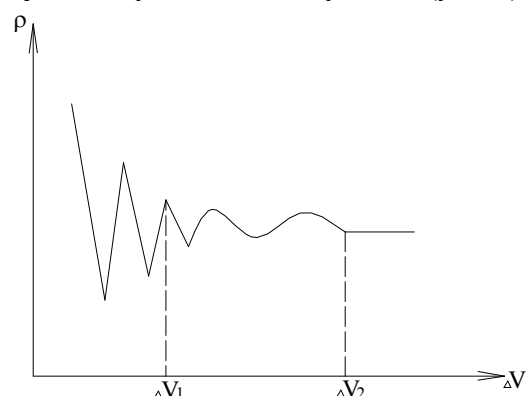
**Технічні вимоги до матеріалу**

Запропонований конструкційний матеріал має такі характеристики:

- густина  $\rho \leq 5 \text{ г/см}^3$ ;
- температура плавлення  $T_{\text{п}} \geq 2000 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- температура кипіння  $T_{\text{к}} \geq 2500 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

- питома теплоємність  $C_{\text{т}}$ , кал/(г.град);
- коефіцієнт теплопередачі  $K_{\text{г}}$ , кал/(см·с)°C;
- коефіцієнт температуропровідності  $K_{\text{т}}$ , см<sup>2</sup>/с;
- межа міцності на розтяг  $\sigma^* \geq 200 \text{ ГН/м}^2$ ;
- межа міцності на зсув  $\tau^* \geq 50 \text{ ГН/м}^2$ ;
- в’язкість руйнування  $K_{\text{к}} \geq 5 \text{ МПа·м}$ ;
- модуль пружності на розтяг  $E = 1000 \text{ ГН/м}^2$ ;
- коефіцієнт Пуассона  $\nu \approx 0$ ;
- електроопір  $\Omega$ , кОм;
- межа пружної деформації  $\varepsilon_{\text{п}} \approx 20 \text{ } \%$ ;
- порогове значення коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) для корозії під напруженням  $K_{1\text{сcc}} \approx K_{\text{к}}$ ;
- коефіцієнти термічного розширення  $\alpha \geq$ ;
- пружне розтягування матеріалу до руйнування;
- збіг діаграми деформування при розвантаженні з діаграмою деформування при навантаженні, тобто відсутність дисипації енергії та залишкових деформацій.

Якщо розглядати об’єм матеріалу  $\Delta V_1$  діаметром до  $10\,000 \text{ \AA}$ , то всі властивості матеріалу описуються кристалічними ґратами, (рис. 1).

Рис. 1. Рівні модельованого об’єму  $\Delta V$ 

У свою чергу, різні кристали окремих зерен складають зернисту структуру матеріалу в межах діаметра мінімального об’єму  $\Delta V_2$  від 1 до 100 мкм.

У більшості випадків в об’ємах діаметром більше 100 мкм матеріал можна вважати однорідним (континуальним).

### Конструювання міцних волокнистих композитів

Матеріал із межевою міцністю одного волокна на розрив у напрямку волокон, що дорівнює  $\sigma_f N_f$  ( $N_f$  – склад волокон у матриці на одиницю площі) можна отримати, якщо велику кількість високоміцних волокон з'єднати за допомогою відповідної матриці.

Статична міцність, вага та жорсткість елемента конструкції є важливими параметрами, які визначають інженерне проектування конструкцій.

Для конструктивних елементів, напружених розтягом, важливими властивостями матеріалу є питома густина, що визначається як відношення межі міцності  $\sigma$  до питомої ваги  $\rho$ , та питома жорсткість ( $E/\rho$ ).

Волокнисті композитні матеріали можуть характеризуватися меншою, ніж у звичайних матеріалів, густиною при однакових модулях. Наприклад, у конструкційному матеріалі з волокон окису алюмінію при об'ємному  $V_f = 0,5$  складі волокон в алюмінієвій матриці питомий модуль збільшується в три рази ніж зі сталевим дротом.

Використання в тих самих умовах волокон карбіду кремнію дає п'ятиразове поліпшення, волокон бору – триразове поліпшення. Не враховуючи жорсткість матриці, отримаємо, що використання графітових вусів може дати питомий модуль матеріалу приблизно в шість разів більше за питомий модуль сталі.

Перевагою використання високомодульних волокон є можливість отримання матеріалів, для яких жорсткість є більш важливою характеристикою за міцність, шляхом використання об'ємного складу волокон, які перевищують 50 %.

Єдиний метал, величина питомого модуля якого наближається до величини  $E/\rho \approx 10^{18}$  см, – це берилій.

Для отримання найбільших значень питомої жорсткості  $E/\rho$ , необхідно використовувати безперервні волокна. У цьому випадку міцність композита в напрямку волокон не залежить від довжини навантаження.

Критичну довжину  $\ell_{кр}$  можна значно збільшити, але це призведе до зниження міцності композиту в поперечному до волокон напрямку.

Металева матриця з тугоплавких металів дозволяє отримувати тугоплавкі конструкційні матеріали. Якщо матриця має високий модуль Юнга, то можливо застосування технологій, які забезпечують перенапруження волокон і матриці, що, у свою чергу, збільшує жорсткість конструкційного матеріалу.

Металева матриця конструкційного матеріалу має такі недоліки:

- циклічне навантаження металевої матриці веде до втоми;
- металеві матриці істотно важкі;
- у металевій матриці можуть виникати пластичні течії (рух дислокацій) при відносно малих навантаженнях.

### Технологія створення металевої матриці конструкційного матеріалу

Спочатку для направленої твердіння розплав заливали у виливницю, яка мала всередині керамічну футерівку, встановлену на мідну плиту, що охолоджується водою. Необхідний температурний градієнт в об'ємі виливниці забезпечували відповідним розташуванням зонних нагрівачів, що дозволяло направити процес твердіння перпендикулярно площині холодильника.

У подальшому в міру поліпшення технології були отримані більш високі швидкості росту зерен в умовах великих температурних градієнтів.

Згідно з однією зі схем [1] виливницю поступово вилучають із гарячої зони в камеру, де створюються відповідні умови для вільного радіаційного охолодження (рис. 2).

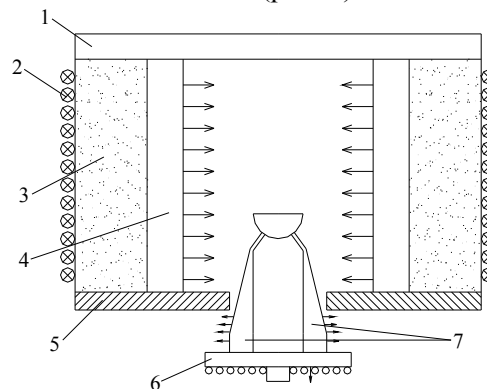


Рис. 2. Пристрій для направленої твердіння злитка:

1 – графітова кришка; 2 – індикатор; 3 – теплоізоляція; 4 – радіатор, який нагріто індикатором; 5 – тепловий екран; 6 – водоохолоджувальний холодильник, який опускається; 7 – виливниця

За іншою схемою виливницю переміщують із гарячої зони через систему послідовно розташованих теплових екранів, після чого вона попадає в охолоджувальну камеру, яка містить швидкоцируюче рідке олово (рис. 3).

За рахунок рідкометалевого охолодження забезпечується безпосередній контакт між формою та виливницею в процесі твердіння, через що температурні градієнти можуть бути великими і постійними протягом усього процесу твердіння.

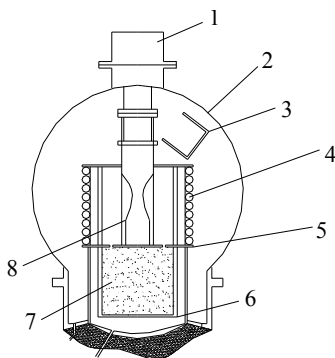


Рис. 3. Пристрій для направленої твердіння відливок за допомогою рідкометалевого охолодження:

1 – механізм занурення; 2 – вакуумна камера; 3 – плавильний тигель; 4 – гаряча зона печі; 5 – тепловий екран; 6 – нагрівачі для плавлення олова; 7 – рідке олово; 8 – форма в зібраному вигляді

### Кування монокристалів

Подрібнення дислокаційної структури в деформованому матеріалі сприяє поліпшенню всіх без виключення механічних властивостей при низьких та проміжних температурах [2]. Як правило, межа міцності, межа текучості, мало- та багатоциклічна втома поліпшуються без істотної втрати пластичності та міцності в умовах повзучості.

Найкращі результати, з точки зору отримання контрольованої мікроструктури при вдосконалюванні властивостей матеріалу, одержано на однорідному сплаві після дифузійного відпалу монокристалів, зрощених методом рідкометалевого охолодження.

У цей час обмежені розміри смуг і злитків з достатньо дрібнозернистою структурою, які можуть бути виготовлені методом рідкометалевого охолодження та подальшою гарячою деформацією.

У зв'язку з удосконалюванням виготовлення матеріалів методом направленої твердіння можливий розвиток кування монокристалевих сплавів.

Важливим принципом розробки сплавів є обробка монокристалів сплавів методами гарячої деформації та мікрорегулювання мікроелементів, які сприяють закріпленню дислокацій у субструктурі.

У праці [1] показано, що високі значення енергії активації та низькі швидкості повзучості нікелевих сплавів на сталій стадії є наслідком сильних взаємодій між дислокаціями та атомами розчинених елементів, які мають визначений, істотно високий показник невідповідності атомних радіусів щодо атомів розчинника, особливо в тих випадках, коли вони зустрічаються в комбінації, наприклад, бор із цирконієм.

### Пресування металевих порошків

Компакти, виготовлені з порошку методом “гаторайзінг”, проявляють виключно однорідність мікроструктури та механічних властивостей. Метод “гаторайзінг”, який використовують під час виробництва газотурбінних дисків і роторів, забезпечує високу точність геометрії виробу.

Консолідація порошків сплавів на нікелевій основі методом гарячої екструзії дозволяє отримати компакт, який має задовільні показники надпластичності безвідносно методу виготовлення компакту або джерела отримання металевих порошків. Безпосереднє застосування для консолідації порошків методу гарячого ізостатичного пресування може і не дати компакт, який має властивості надпластичності залежно від вихідного розміру зерна частинок порошку.

Достатньо малий розмір зерна в частинках, є передумовою для розвитку дрібнозернистої, характерної для надпластичного матеріалу структури в компакт, отриманій методом гарячого ізостатичного пресування. Дана вимога передбачає необхідність використання дуже високих швидкостей охолодження під час виготовлення порошку. Деякі успіхи досягнуті за рахунок використання методів розпилення розплаву струменем інертного газу (аргону) при забезпеченні додаткового охолодження.

Альтернативою швидкоохолоджувальним порошкам є порошок, що було піддано холодній деформації прокаткою. Деформація призведе до рекристалізації в об'ємі частинок у процесі їх консолідації гарячим ізостатичним пресуванням, у результаті чого продукт буде мати властивості надпластичності.

Після повної обробки монокристалів гаряче ізостатичне пресування виштовхне гарячу екструзію на другий план при виготовленні порошкових компактів для штампування в умовах надпластичності.

### Ниткоподібні кристали

Ниткоподібні кристали, або вуса, є найбільш міцними твердими тілами. Ниткоподібні кристали графіту мають найбільші із відомих величин  $G/\rho$  та  $E/\rho$ .

Ниткоподібне зростання пов'язують із дендритним ростом кристалів у рідині, але зазвичай цим терміном позначають такий процес росту твердого тіла, який призводить до виникнення нерозгалуженого волосяного кристала. Ці кристали міцні. Їх максимальна міцність збільшується і зменшенням вусів, починаючи із досягнення діаметра менше 10 мкм. Для всіх металевих і не-

металевих вусів, які не мають площин стійкості паралельних осі вусів діаметром менше 10 мкм, отримують дуже схожі відношення міцності до модуля пружності. Більшість ниткоподібних кристалів, металевих і неметалевих, до руйнування деформуються лише пружним способом.

Таким чином, найбільш міцні ниткоподібні кристали можуть бути одержані на основі металів і неметалів з великими значеннями модуля Юнга.

Найбільші модулі Юнга – у алмаза, вольфраму, молибдену, заліза, карбиду титану, окису алюмінію. Певно ідеальні ниткоподібні кристали складаються з одного ланцюжка атомів. Окремі ланцюжки можуть бути криволінійними. Найбільш жорсткий ланцюжок той, у якого всі атоми розташовані на одній кривій. Якщо би вдалося всі ланцюжки витягнути в одному напрямку та якщо би всі вони руйнувалися одночасно, то можна було би отримати дуже міцний і жорсткий матеріал (рис. 4).

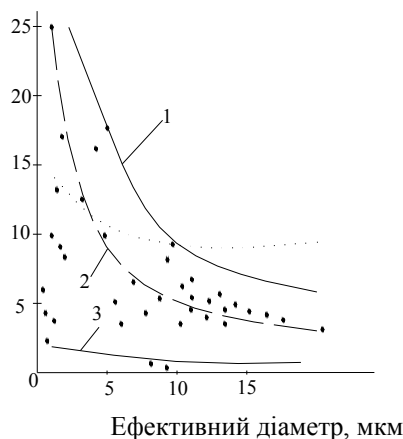


Рис. 4. Залежність вимірної міцності ниткоподібних кристалів сапфіра від ефективного діаметра зразка:

1 – окис вольфраму; 2 – окис заліза; 3 – окис алюмінію

#### Доповнення до ниткоподібних кристалів

Досліди на розтяг дуже тонких ниткоподібних кристалів заліза, міді та срібла розглянуто в праці [2]. Міцність цих зразків наближалася до теоретичної міцності на зсув. Виміряні найбільші значення міцності  $\sigma^*$  при кімнатній температурі зведені в таблицю.

#### Міцність кристалів металів на розтяг і зсув

Метал	Орієнтація	Діаметр, мкм	$\sigma^*$ , ГН/м <sup>2</sup>	Система ковзання	$\tau^*$ , ГН/м <sup>2</sup>	$\tau^*/G$
Fe	[111]	1,6	13,1	[111]	3,56	0,052
Cu	[111]	1,25	2,94	[011]	0,84	0,027
Ag	[001]	3,8	1,73	[011]	0,71	0,036

#### Збільшення об'ємного модуля деформації

Модуль деформації можна збільшувати за рахунок структурних перетворень кристалів при гідростатичному стисканні.

Фазові перетворення, які протікають при тиску до  $10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>, призводять до збільшення густини на 2560 % та до аналогічного збільшення об'ємного модуля деформації. Наприклад,  $\alpha$  кварц  $\text{SiO}_2$  з густиною 2,65 г/см<sup>3</sup> перетворюється з густиною 4,26 г/см<sup>3</sup>, густина форстериту  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  змінюється з 3,05 до 4,24 г/см<sup>3</sup>, шпикелі  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  з 3,42 до 4,15 г/см<sup>3</sup> [1].

Більшість металів із щільно упакованою структурою, а також такі речовини, як окис магнію та окис алюмінію, не відчувають фазових перетворень. Їх густина збільшується, при цьому величина  $\rho/\rho_0$  досягає 0,4 при тиску  $1 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup> та одиниці при тиску  $4 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>. Тобто об'ємний модуль усіх матеріалів при таких тисках знаходиться в межах  $(1218) \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>.

**Напрямок досліджень** – необхідна технологія створення високого тиску  $10^{11}$  Н/м<sup>2</sup> при часі до 1 с при температурах менше температури плавлення матеріалу.

#### Аналіз міцності матеріалу на рівні, який працює на розтяг

Самий міцний сталевий дріт виготовлений зі сталі, яка містить 0,9 % C, 0,4 % Mn і 0,2 % Si.

Сталь піддають аустенизації, тобто переводять в стан твердого розчину з гранецентрованого кристала (ГК) – граткою, витримуючи при 1000 °С декілька хвилин. Далі при 500 °С отримують таку перлітову структуру – суміш пластинок фериту та цементиту  $\text{Fe}_2\text{C}$ . На цій стадії відстань між пластинками цементиту в перліті становить близько  $700 \text{ \AA}$ , перлітові колонії не орієнтовані. Після волочіння дроту до деформації близько 0,7 пластинки цементиту орієнтуються в напрямку волочіння. Орієнтування проходить шляхом ковзання в тих площинах цементиту, які із самого початку орієнтовані в напрямку волочіння, а також шляхом, який супроводжується ковзанням, руйнування останніх пластинок. Після волочіння дроту до деформації, яка дорівнює близько 3 (300 %), структура дроту складається із мереж, відносно вільних від дислокацій, та меж цих мереж, в яких густина дислокацій велика. Ці чарунки витягнуті в напрямку осі дроту. Поперечний розмір чарунк дорівнює  $100 \text{ } 200 \text{ \AA}$  і зменшується із зростанням деформацій волочіння.

У процесі волочіння межа текучості змінюється обернено пропорційно кореню квадратному з діаметра дроту.

Очевидно, після волочіння відстань між атомами у витягнутих чарунках більше, ніж до волочіння. У результаті цього залишкова енергія деформації до руйнування менше за дріт, який був підданий волочінню. У дроті після волочіння присутні залишкові розтяжні напруження. Можлива поява мікротріщин. Унаслідок цього довговічність при циклічному напруженні, а також циклічна тріщиностійкість (КІН) дроту після волочіння менша ніж до волочіння.

Зберегти всі позитивні властивості, отримані внаслідок перебудови кристалічних чарунк ГК (структури у волокнах та пластинках) і за рахунок орієнтування цих волокон уздовж осі дроту, і не зменшити довговічність дроту при циклічному навантаженні можна, застосувавши технологію не повздовжнього розтягу, а поперечного стискання дроту (кування).

На рис. 5 показано, що після поперечного кування в місці удару діаметр дроту  $D_1$  до удару дорівнював відстані між лініями  $A$  та  $E$ , після удару  $D_2$  – між лініями  $a$  та  $e$ .

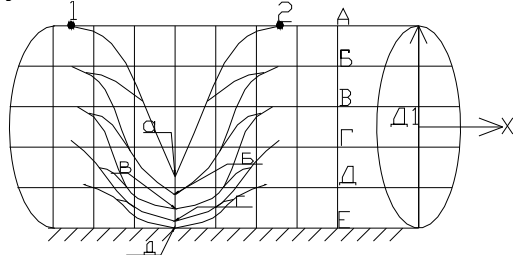


Рис. 5. Деформування сітки, яка нанесена на поверхню дроту після кування поперечної осі  $X$

Чарунки сітки витягнулися вздовж осі  $X$ , оскільки відстань між точками 1 та 2 до удару менше, ніж після удару. Чарунки сітки стиснулися в напрямку, поперечному осі  $X$  (осі дроту), оскільки відстань між лініями  $a$  та  $b$  менше ніж відстань між лініями  $A$  та  $B$ .

Очевидно, що при куванні не лише на ділянці 1, 2, але й по всій довжині дроту можна отримати дріт з малим діаметром і всі чарунки будуть витягнуті у волокна по осі дроту. Метод кування дозволяє отримати витягнуті чарунки з залишковими стискальними напруженнями поперечно осі дроту, з меншими відстанями між волокнами поперечно осі дроту, а отже, на одиницю площі поперечного перерізу припадає більше волокон, що збільшує міцність і жорсткість ковального дроту. Після кування пор і мікротріщини немає.

#### Технологія отримання високоміцного високомодульного конструкційного металокомпозиту

1. Із металів (сталі, нікелю, вольфраму) виготовляють тонкостінну вилиту трубу, натягнуту на сердечник у вигляді керамічних кілець.

Виливання труби проходить під високим гідростатичним тиском.

Кожна з труб піддана аустенізації, тобто її переводять у стан твердого розчину з ГК граткою при температурах, які з плином часу необхідні для росту кристалів у вигляді пластинок фериту, нікелю, вольфраму.

При температурі, нижчою за температуру аустенізації, але достатньо високою для того, щоб метал був м'яким і в'язі між пластинками фериту, нікелю, вольфраму були слабкими, але міцність пластинки достатньо високою, щоб не рухатися, труба піддана крученню.

Унаслідок кручення пластини повертаються та орієнтуються паралельно площинам ковзання.

2. Після появи яскраво виражених смуг ковзання трубу розрізають на смуги строго паралельно смугам ковзання.

3. Окремі смуги скручують у прутки так, що смуги ковзання тепер розташовані вздовж прутків. У таких прутках більшість феритових пластинок розташовані паралельно осі прутка, ніж в звичайному дроті.

4. Прутки діаметром 5–3 мм виготовляють із сталі,  $\beta$ -титану, нікелю, вольфраму, берилію, в яких повністю немає сірки, фосфору, водню, але є мінімальна кількість кремнію, вуглецю.

Кожний із прутків піддають аустенізації, тобто приводять до твердого розчину з ГК граткою, витримуючи при оптимальній температурі для кожного металу до тих пір, доки йде процес росту кристалів у твердому розчині так, щоб у сталевому дроті виникли феритові пластинки, у нікелевому – нікелеві, у вольфрамовому – вольфрамові.

Кожний із прутків далі при температурі трішки нижче за температуру аустенізації піддають волочінню до деформацій близько 70 %.

5. Після волочіння при температурах, нижчих за температури аустенізації, прутки піддають куванню поперечно осі прутків для усунення пор та мікротріщин. Кування дозволяє зменшити відстань між волокнами та пластинками.

При високих температурах відстань між пластинками більше ніж при низьких температурах, тому слід піддавати куванню прутки з поступовим зниженням температури до тих пір, доки прутки не подовжаться на 300 %.

Без сумніву, міцність та жорсткість попередньо тягнутих, а потім кованих прутків більше відповідного вилитого металу в стільки разів, у скільки зменшується діаметр прутка після волочіння та подальшого кування.

### **Моделювання конструкційного металокомпозиту з заданою діаграмою деформування**

Для отримання стрижнів або дроту, який працює на розтягання заданого діаметра, щільності, жорсткості, міцності, необхідно прутки з волокнистою структурою малого діаметра до 1 мм із різних металів спресувати в пруток або стрижень необхідного діаметра.

Для отримання листів необхідної міцності, працюючих на розтягання, а не на згинання, потрібно окремі прутки волокнистої структури, укладені паралельно, спресувати в лист.

Для отримання рівномірних листів, працюючих на розтягання в двох напрямках, необхідно спресувати три листи: верхній і нижній із взаємно перпендикулярно розташованими волокнистими прутками, середній – з більш жорсткого металу з волокнами, розташованими під кутом  $45^\circ$  до волокон верхнього і нижнього листів. Це дозволяє більш рівномірно перерозподіляти навантаження.

Комбінуючи волокнистими прутками різних металів з відомою (отриманою експериментально) діаграмою деформування, можна моделювати будь-яку діаграму.

### **Напрямок подальших досліджень**

Для комбінування металокомпозиту з заданою діаграмою деформування необхідно побудувати діаграми деформування волокнистих прутків із різних металів і різним ступенем подовження волокон. Високий гідростатичний тиск при виливанні тонкостінних труб можна створити за допомогою вибуху кумулятивного заряду з металеві пластинки так, щоб після вибуху струмінь металу заповнив форму у вигляді труби.

### **Висновки**

Виконано аналіз і запропоновано алгоритм технологічного процесу створення конструкційного металокомпозиту високої міцності та жорсткості. Для моделювання технології зростання кристалічних волокон запропоновано автоматизовану систему моделювання термодинамічних процесів твердих розчинів і кристалів. Розроблено автоматизовану систему моделювання та конструювання композиційних матеріалів із заданими властивостями.

### **Список літератури**

1. Келли А. Высокопрочные материалы. – М.: Мир, 1976. – 261 с.
2. Лисицкая Л.А. Секреты сверхмелкого зерна стали. – М.: Металлург, 1997. – 142 с.

Стаття надійшла до редакції 01.11.04.

Т.И. Матченко, О.С.Рожновская

Анализ технологий создания конструкционных материалов с высокой прочностью на растяжение

Выполнен анализ технологических процессов создания конструкционных металлокомпозитов с высокими заданными значениями прочности, жесткости и низкими заданными значениями плотности, термического расширения.

T.I. Matchenko, O.S.Rozhnovsky

Technologies creation analysis of constructive materials of high on tension constructive materials

The analysis of technological processes of constructive metalcompositives with the given high strength meaning, rigidity and the given low density meanings of thermal expansion was done.